

LES による 2 次元角柱に作用する変動風圧力の数値解析 (第 3 報)

— 強制振動の影響に関する実験値との比較 —

Numerical Simulation of Fluctuating Surface Pressure on 2D Square Prism

村 上 周 三*・持 田 灯*・坂 本 成 弘**
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Shigehiro SAKAMOTO

1. 序

筆者等は既報^{1)~3)}において 2 次元角柱周りの流れに対して LES の 2 次元計算, 3 次元計算を比較し, 3 次元 LES の結果が静止角柱に作用する風圧変動の性状をきわめて正確に再現する事を示した。また, たとえ平均流が 2 次元流であっても 2 次元計算では角柱周りの非定常流体現象を正しく予測する事が困難である事を過度場の 3 次元構造と関連づけて明らかにした^{2), 3)}。本稿では, 強制振動させた 2 次元角柱周りの流れについて LES による 3 次元数値計算を行い, Bearman 等の実験⁴⁾と比較した結果を示す。

2. 数値計算の概要

2.1 解析対象

解析対象は, 乱れの無い一様流中に置いた正方形断面の 2 次元角柱で, 角柱を主流方向 (X_1) および角柱ス

パン方向 (X_3) に直交する方向 (X_2) に正弦波振動させた。計算ケース一覧を表-1 に示す。静止角柱のケース 0 を含む 5 ケースについて行った。振動角柱では, 振動振幅 $A/D=0.10, 0.25$ について, 角柱後流に生じるカルマン渦の発生振動数がロックインされる振動数域内⁴⁾において行った。具体的には, 振動振幅 $A/D=0.10$ では振動数 $N_p D/U_0=1/7.5$ (ケース 10), $A/D=0.25$ では $N_p D/U_0=1/7.5$ (ケース 20), $1/8.5$ (ケース 21), $1/10.0$ (ケース 22) の合計 4 ケース。

2.2 計算方法

LES の基礎式を表-2 に, 計算条件を表-3 に示す。本計算ではレイノルズ数 ($U_0 D/\nu$) を Bearman 等の実験⁴⁾とほぼ対応する 2.2×10^4 とし, Smagorinsky 定数 C_s は 0.1 とした。境界条件は X_2 および X_3 方向が周期境界, X_1 方向の流出境界は $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$ に関して $\partial/\partial X_1=0$ 。角柱壁面境界には Werner Wengle による power law 型の 2 層モデル (表-4⁵⁾) を用い, 壁近傍では格

Table 1 Simulation cases

case	Amplitude (A/D)	Frequency ($N_p D/U_0$)
case0	0.	-----
case10	0.10	1/7.5
case20	0.25	1/7.5
case21	0.25	1/8.5
case22	0.25	1/10.0

Table 2 Model equations for LES

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} k^* \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_{sgs} \bar{s}_{ij}) - \hat{v}_p \delta_{ij}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$v_{sgs} = (C_s h)^2 \cdot \left(\frac{\bar{s}_{ij}^2}{2} \right)^{1/2} \quad \bar{s}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad k^* = \frac{v_{sgs}^2}{(C_K h)^2}$$

$$h = (h_1 h_2 h_3)^{1/3} \times (1 - \exp(-y^*/25)), \quad C_s = 0.10, \quad C_K = 0.094$$

Table 3 Specification for computations

$L_1 \times L_2 \times L_3$	$N_1 \times N_2 \times N_3$	boundary conditions		
		inflow	outflow	x_2 x_3
20.0×12.0×2.0	104×69×10	$\bar{u}_1=1.0, \bar{u}_2=-V_p, \bar{u}_3=0.0$	$\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$: free slip	cyclic cyclic

L_i : computational domain for x_i direction
 Δt : time interval for time marching = 0.001
 No velocity fluctuation is imposed at inflow boundary.

N_i : number of grid points in x_i direction
 h_p : mesh interval adjacent to solid wall = 0.025

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 民間等共同研究員 (大成建設(株)技術研究所)

子スケール h に wall damping function $(1 - \exp(-y^+/25))$ を乗じた。また、圧力緩和は HSMAC 法⁶⁾、差分スキームは、空間には Piacsek Williams 型の 2 次量保存スキーム⁷⁾、時間には移流項に Adams Bashforth スキーム、拡散項に Crank Nicolson スキームを用いた。

<記号>

- X_i : 空間座標の 3 成分
($i=1$: 主流方向, $i=2$: 主流直角横方向, $i=3$: 角柱軸方向),
- u_i : 流速の i 方向成分 (角柱に対する相対速度),
- h_i : i 方向のメッシュ幅,
- $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値, \bar{f} : 格子平均,
- f : 時間平均からのずれ ($=\bar{f} - \langle f \rangle$),
- ρ : 流体密度, Re : Reynold 数 ($=U_0 D / \nu$),
- U_0 : 流入平均風速 (空間及び時間について),
- D : 角柱一辺の長さ, t^* : 無次元時間 ($=t U_0 / D$),
- p : 流れ場の圧力 (瞬時値),
- p_w : 壁面圧力 (瞬時値, P_0 基準),
- P_0 : 基準圧力 (流れ場全体の空間平均圧力),
- C_p : 風圧係数 (瞬時値, $p_w / ((1/2)\rho U_0^2)$),
- F_D : 抗力 (瞬時値), F_L : 揚力 (瞬時値),
- V_p : 振動角柱の速度 ($2\pi N_p A \cos(2\pi N_p t)$),
- A : 振動角柱の変位, N_p : 振動角柱の振動数,
- S : ストローク数, S_f : 静止角柱の S ,
- $R_p(x)$: 圧力の空間相関係数
 $= \langle p(x_0) p(x) \rangle / (\sqrt{\langle p(x_0)^2 \rangle} \sqrt{\langle p(x)^2 \rangle})$,
- x_0 : 参照する圧力の位置,
- y^+ : 壁座標 ($u_* y / \nu$), u_* : 摩擦速度,
無次元化は D, U_0 を用いて行う。

Table 4 Wall boundary conditions⁵⁾

$\frac{\bar{u}}{u_*} = y^+$	($y^+ \leq 11.81$)
$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8.3 y^{+1/7}$	($y^+ > 11.81$)

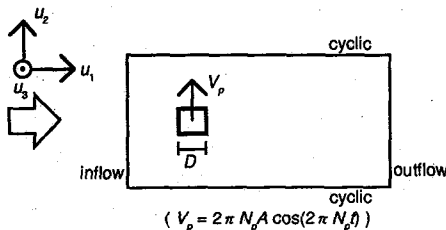


Fig. 1 Flow conditions

2.3 データの採取

注 1 に示す。

2.4 角柱の振動の計算

対象とする流れ場の状況を図-1 に示す。本解析ではメッシュ系は変形させずに計算領域内の角柱の位置をメッシュに対して固定したまま、計算領域全体が角柱も含めて振動しているものとして取り扱う。したがって、本解析で計算される流速 \bar{u}_i は角柱 (座標系) の移動速度に対する相対速度であり、角柱の振動は運動方程式に角柱の加速度 \dot{V}_p に流体密度 ρ を乗じた慣性力 $\rho \dot{V}_p$ と同じ絶対値を持ち、逆符号の外力項 $-\rho \dot{V}_p$ を計算領域全体に一律に加える事によって表現される (表-2)。表-2 の方程式系は固定座標系で定義される方程式系を角柱の移動速度 $V_p(t)$ で移動する座標系に変換した結果とみなすことができ、通例のガリレイ変換を施した結果に対して、さらに座標系の移動速度 V_p の時間微分項 \dot{V}_p を付加した形式となる。また、この方程式系は Hirt 等の開発した ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法⁸⁾ の方程式系を変形し、 V_p の空間微分を 0 とした形と一致する。今回の計算では角柱は X_2 方向にのみ並進振動するため、 u_2 の方程式にのみ計算領域全体に同じ値の慣性力 $-\rho \dot{V}_p$ を加える事になる。又、流入境界では $u_2 = -V_p$ となる (表 3)。

3. 計算結果

3.1 $\langle C_p \rangle$ の分布

静止角柱 (ケース 0) および振動角柱 ($A/D=0.25$, ケース 20: $N_p D / U_0 = 1/7.5$, ケース 21: $N_p D / U_0 = 1/8.5$) に作用する $\langle C_p \rangle$ の分布を図-2 に示す。これらの分布は無次元時間 50 の平均値をさらにスパン (X_3)

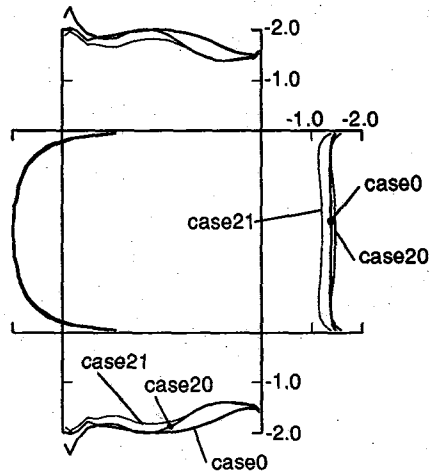


Fig. 2 Distribution of $\langle C_p \rangle$

研 究 速 報

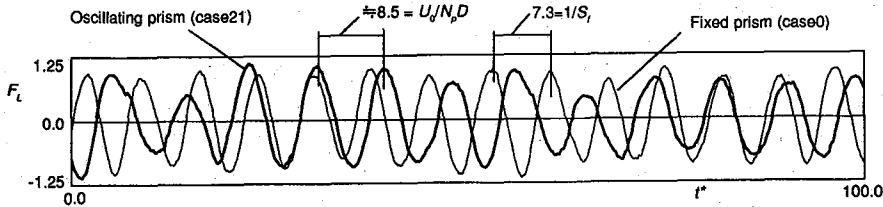


Fig. 3 Time history of lift force

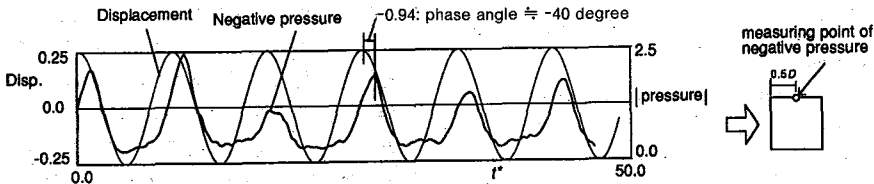


Fig. 4 Phase angle of negative pressure on the side face and prism displacement
(Computation: case21; $A/D=0.25$, $N_p D/U_0=1/8.5$)

方向に平均して求めたものである。静止角柱（ケース 0）と比べて振動角柱では、側面の風下近くの $\langle C_P \rangle$ の絶対値が側面中央部の負圧の絶対値に比べて低下する傾向が認められる。また、振動角柱どうしを比べるとケース 20 ($N_p D/U_0=1/7.5$) とケース 21 ($N_p D/U_0=1/8.5$) では振動数の低いケース 21 の方が全般に $\langle C_P \rangle$ の絶対値が小さい。これらの傾向は既往の実験と対応している⁴⁾。

3.2 角柱に作用する変動風圧力の振動数

静止角柱（ケース 0）および振動角柱（ケース 21： $A/D=0.25$, $N_p D/U_0=1/8.5$ ）の場合の揚力 F_L (X_3 方向の単位長さあたりに作用する揚力) の時刻歴を図-3 に示す。この F_L の振動数はそれぞれの後流のカルマン渦発生振動数 S (ストローハル数) と対応している。静止角柱においては S が約 $1/7.3$ となっているのに対し、振動角柱では S が角柱の振動数 ($N_p D/U_0$) にロックインされて $1/8.5$ となっている。ここには示さないが、他のケース 10, 20, 22 に関しても、実験⁴⁾ でカルマン渦発生振動数 S がロックインされる振動数内に角柱の振動数があり、計算においても S が角柱振動数にロックインされる事が確認できた。

3.3 角柱の振動と作用する風圧力の位相

振動角柱（ケース 21： $A/D=0.25$, $N_p D/U_0=1/8.5$ ）の場合の角柱側面中央に作用する負圧 (X_3 方向に平均した値) と角柱変位の時刻歴を図-4 に示す。変位・負圧のピーク間で比較すると角柱の位相差は無次元時間で約 -0.94 、位相角で -40 (deg) である事がわかる。この値は既往の実験⁴⁾ とおおむね対応している。同様にして、他のケースについて負圧と角柱変位の位相 ϕ を実験値⁴⁾ と比較して図-5 に示す。計算値は、角柱に作用する負

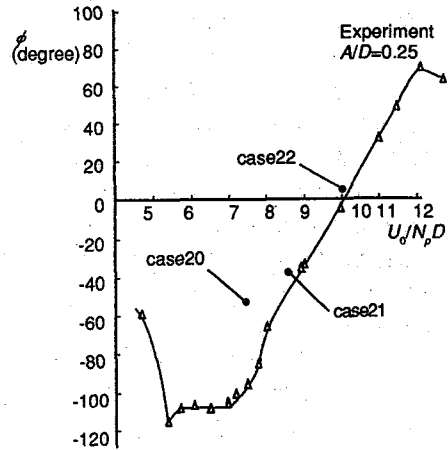


Fig. 5 Phase angle of negative pressure on the side face and prism displacement (Experiments by Bearman et al [4])

圧の、角柱振動数成分の位相差である。ケース 21, 22 では実験値と良く対応しているが、ケース 20 は対応していない^{注2)}。

角柱側面中央の負圧の位相は角柱に作用する揚力 F_L の位相に対応するもので、よく知られている様に、位相 ϕ が正となる時に角柱に負減衰力が生じる。今回行った計算では位相 ϕ は非常に小さい正值から負値となる振動数範囲で、角柱に大きな負減衰力は生じない場合である。位相 ϕ が大きな正值となるような場合に関しても今後検討を進める予定である。

3.4 角柱側面の変動風圧力の相関

静止角柱（ケース 0）と振動角柱（ケース 10： $A/D=0.10$, $N_p D/U_0=1/7.5$ ）の角柱側面に作用する変動

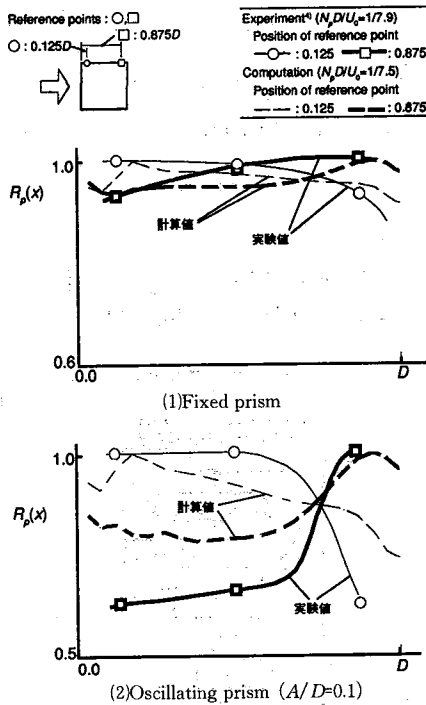


Fig. 6 Distribution of correlation between pressures on the side face

風圧力の相関を図-6に示す。計算値は、 $\langle \overline{C_P} \rangle$ や F_L と同様に無次元時間で約50の間で求めた相関係数を X_3 方向に平均した値である。実験値⁴⁾によると、静止角柱では参照点 $X/D=0.125, 0.875$ の圧力に対して共に角柱側面全体に渡って相関係数が0.9以上と高くなっている。これに対して、振動角柱では参照点 $X/D=0.875$ の場合、参照点から少し離れると相関係数が急激に0.7程度まで低下し、参照点 $X/D=0.125$ の場合も角柱風下隅付近では相関係数が0.6程度まで低下する。計算値に関しては、静止角柱の場合の計算結果は相関係数が全般に高く実験値との対応は良い。また、振動角柱では参照点から離れると相関係数は0.7~0.8程度となり、角柱の振動により相関が低くなる傾向は計算において一応再現されている。

4. ま と め

(1)実験においてロックイン現象が生じる角柱振動数内で、LESの解析においてもカルマン渦発生振動数がロック

インされる事を確認した。

(2)ロックインされている状態における角柱側面の負圧と角柱変位の位相差の関係も $N_P D / U_0$ が静止角柱の S_f と きわめて近い場合を除き、よく計算で再現される。

(3)角柱側面に作用する変動風圧力の空間相関の分布に関しても計算結果は実験の傾向をおおむねとらえている。

(1992年10月28日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Murakami, et al.; Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by k-ε, ASM and LES, 8th Proc. ICWE, 1991.
- 2) 村上他; LESによる2次元角柱に作用する変動風圧力の数値解析(第2報) 2次元計算と3次元計算の比較, 生産研究, vol.44, pp97-101, 1992.
- 3) 持田他; LESによる2次元角柱に作用する変動風圧力の解析; 2次元計算と3次元計算の比較, 第5回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.99-102, 1991.
- 4) P.W. Bearman et al.; An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders, J. Fluid Mech. 119, pp.297-321, 1982.
- 5) Werner, H. et al.; Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in plate channel, Proc. 8th Symp. on Turbulent Shear Flows, 19-4, Munich, 1991.
- 6) J.A. Viccelli; A Computing Method for incompressible Flows Bounded by Moving Walls, J. Computational Physics 8, pp.119-143, 1971.
- 7) S.A. Piacsek et al.; Conservation Properties of Convection Difference Schemes, J. Computational Physics 6, pp.392-405, 1970.
- 8) C.W. Hirt et al.; An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds, J. Computational Physics 14, pp.227-253, 1974.

[注]

[注1] 振動角柱の各ケースともに、静止角柱の結果を初期条件として、定常状態に達する迄無次元時間 ($t^* = tU_0/D$) で約100 (1×10^5 ステップ) 計算した後、 $t^* \approx 50$ (5×10^4 ステップ) の間でデータを採取した ($\Delta t^* = 1 \times 10^{-3}$)。

[注2] 今回の計算では静止角柱の場合のストローハル数 S_f は1/7.3となっているが実験値では $S_f=1/7.7$ と報告されている⁴⁾。ケース20の振動数 $N_P D / U_0=1/7.5$ は、計算における静止角柱の S_f よりも低い、大変微妙な振動数域にある。またこの振動数付近では位相の変化が大きい事等からケース20では実験との対応が良くなかったと考えられる。